

INTERFEROMETER

Publication Number: 2002-310611 (JP 2002310611 A) , October 23, 2002

Inventors:

- OSAKI YUMIKO
- SUZUKI AKIYOSHI
- SAITO KENJI

Applicants

- CANON INC

Application Number: 2001-110000 (JP 20011110000) , April 09, 2001

International Class:

- G01B-009/02

Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an interferometer capable of measuring an aspheric shape with the same accuracy as that of a sphere and measuring various face shapes, and provide a semiconductor exposing device, using an optical element which uses the interferometer. SOLUTION: This interferometer 101, measuring the face shape of the optical element 5 by use of interference, has a reference wave front deforming system that causes the wave front of a reference light to be deformed. The interferometer 101 has an elastic deformation mirror 21 and a reference face 22 whose features are known, on the reference light side, and a face deformation monitor means 103 for monitoring a deformation amount of the elastic mirror 21 by use of interference information formed by light flux therefrom. COPYRIGHT: (C)2002,JPO

JAPIO

© 2003 Japan Patent Information Organization. All rights reserved.

Dialog® File Number 347 Accession Number 7442100

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-310611

(P2002-310611A)

(43) 公開日 平成14年10月23日 (2002.10.23)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 1 B 9/02

識別記号

F I

G 0 1 B 9/02

マーク (参考)

2 F 0 6 4

審査請求 未請求 請求項の数21 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2001-110000(P2001-110000)

(22) 出願日 平成13年4月9日 (2001.4.9)

(71) 出願人 000001007

キヤノン株式会社

東京都大田区下丸子3丁目30番2号

(72) 発明者 大寄 由美子

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

(72) 発明者 鈴木 章義

東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

(74) 代理人 100086818

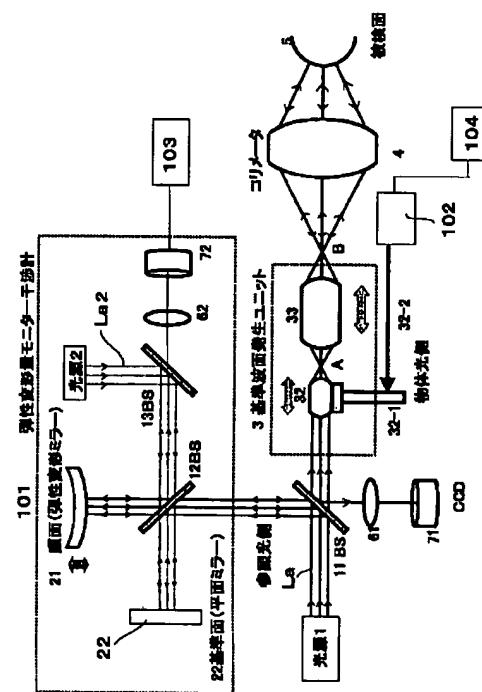
弁理士 高梨 幸雄

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 干渉計

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 非球面の形状を球面と同じ精度で測定が可能で、かつ種々の面形状の測定に対応できる干渉計及びそれを用いた光学素子を用いた半導体露光装置を得ること
【解決手段】 干渉を利用して光学素子の面形状を測定する干渉計101において、参照光の波面を変形させる参照波面変形システムを有する。また、参照光側に、弾性変形ミラー21とあらかじめ素性の分かった基準面22を有して、それらからの光束より形成される干渉情報用いて、弾性ミラーの変形量をモニターする面変形量モニター手段103を有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 干渉を利用して光学素子の面形状を測定する干渉計において、参照光の波面を変形させる参照波面変形システムを有することを特徴とする干渉計。
【請求項2】 前記参照波面変形システムは、光学素子の面形状を作成することが出来る面形状が可変の弾性変形ミラーを参照光側に有することを特徴とする請求項1記載の干渉計。

【請求項3】 前記参照波面変形システムは参照光側に、前記弾性変形ミラーとあらかじめ素性の分かった基準面を有し、弾性変形ミラーと基準面からの光束より形成される干渉情報を用いて、弾性変形ミラーの変形量をモニターする面変形量モニタ手段を有することを特徴とする請求項2記載の干渉計。

【請求項4】 参照光側に配置した基準面の形状は不变であることを特徴とする、請求項3記載の干渉計。

【請求項5】 前記参照波面変形システムで用いる干渉用の光束の波長は光学素子の面形状の計測に用いる光束の波長と異なることを特徴とする、請求項3記載の干渉計。

【請求項6】 干渉を利用して光学素子の面形状を測定する干渉計において、参照光側には面形状を変化させることが出来る該弾性変形ミラー、物体光側では面形状の測定基準となる波面を作成することが出来る基準波面発生ユニットを具備することを特徴とする干渉計。

【請求項7】 前記参照光側の弾性変形ミラーと、物体光側の基準波面発生ユニットを用い、両者の波面から所望の非球面波面を作成し、参照光の波面と物体光の波面を観察面において干渉させるよう、両者の調整を行うことを特徴とした請求項6記載の干渉計。

【請求項8】 物体光側の基準波面発生ユニットが波面の動径(R)の4次を中心とした低次成分を生成し、参照光側の弾性変形ミラーでは動径(R)の6次以上の高次成分を生成することを特徴とした請求項7記載の干渉計。

【請求項9】 前記基準波面発生ユニットは球面収差発生手段を有することを特徴とする請求項6、7又は8記載の干渉計。

【請求項10】 前記球面収差発生ユニットは、複数のレンズを有し、このうち2つのレンズのレンズ間の距離を調整することによって球面収差を発生していることを特徴とする請求項9記載の干渉計。

【請求項11】 前記基準波面発生ユニットはアルバレズレンズを有することを特徴とする請求項2乃至10のいずれか1項に記載の干渉計。

【請求項12】 前記アルバレズレンズは波面の動径の6次以上の波面成分が測定可能な範囲に調整することを特徴とする請求項11記載の干渉計。

【請求項13】 前記アルバレズレンズは、それが補正する波面の動径の次数に対応して複数個設けられている

ことを特徴とする請求項12記載の干渉計。

【請求項14】 前記アルバレズレンズは波面の動径の4次以上の波面成分が測定可能な範囲に調整することを特徴とする請求項11記載の干渉計。

【請求項15】 前記基準波面生成ユニットで可変的に波面を生成する際に、光軸上、移動する光学部材の位置情報をモニタする位置情報モニタ手段を有することを特徴とする請求項6記載の干渉計。

【請求項16】 前記光学部材の移動量に応じて、発生する波面を演算手段で計算し、基準波面として用いることを特徴とする請求項15記載の干渉計。

【請求項17】 前記面変形量モニタ手段で用いる干渉用の光束の波長は光学素子の面形状の計測に用いる光束の波長と同一であることを特徴とする、請求項3記載の干渉計。

【請求項18】 物体光側の基準波面発生ユニットが生成する波面の動径の次数と参照光側の弾性変形ミラーが生成する波面の動径の次数とは互いに異なっていることを特徴とした請求項6記載の干渉計。

【請求項19】 請求項1乃至18のいずれか1項の干渉計を用いて作成された光学素子を用いることによって作成されたことを特徴とする半導体露光装置。

【請求項20】 請求項1乃至18のいずれか1項の干渉計を用いて光学素子の表面形状を測定することを特徴とする面形状測定方法。

【請求項21】 参照光側にアルバレズレンズを有することを特徴とする請求項2乃至8のいずれか1項に記載の干渉計。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は干渉計に関し、被検物として球面から非球面にわたる広範囲な面形状に対応し高精度で被検物の面形状を測定する際に好適なものである。

【0002】 この他本発明は、マスク上のパターンを感光性の基板に転写し、半導体素子を製造する等のリソグラフィ工程で使用される投影光学系を構成する各光学素子(レンズ、フィルター等)の球面や非球面等の面形状を高精度に測定する際に好適なものである。

【0003】

【従来の技術】 光学系におけるイノベーションは常に新しい光学素子、あるいは自由度の導入によってもたらされている。この中で非球面の導入による光学性能の改善は天体望遠鏡の昔から追及されてきた項目の一つであるが、近年、加工法や計測法の改善により、最も精度が要求される半導体素子製造用の半導体露光装置に導入されるところにいたった。

【0004】 半導体露光装置における非球面の効果は大きく分けて3つある。第一の効果は光学素子の枚数の削減である。短波長化に伴い半導体露光装置の光学系には

石英や螢石といった高価な材料を使用せざるを得なくなってきた。非球面の効果による光学素子の枚数の削減は製作面及びコスト面で非常に効果が大きい。第二の効果はコンパクト化である。非球面の効果として光学系を小型化することが可能となって、やはり製作及びコストに対する影響が無視できないほど大きい。第3の効果は高性能化である。高NA化や、低収差化でますます要求精度の高くなっている光学系の性能を達成する手段として非球面の果たす役割は非常に重要となっている。

【0005】また、最近ではパターンの微細化の加速に伴って次世代を担う露光方式としてEUVを用いる方式が本命視されている。EUV (Extreme Ultra Violet) では従来の光露光で用いられてきた光の波長の1/10以下約1.3, 4nmという短い波長の光を用いて、反射結像光学系によりレチクル上の像をウェハーに転写する。EUVの領域では波長が短すぎる為、光が透過する光学部材（透過材料）が存在せず、光学系はレンズを用いないミラーのみの構成となる。しかしながら、EUVの領域では反射材料も限られており、1面あたりのミラーの反射率は70%弱しかない。従って、従来のレンズを用いた光学系の様に20枚を越えるような光学系の構成は光利用効率の面から不可能で、なるべく少ない枚数で所定の性能を満足する結像光学系を構成しなければならない。

【0006】現在、EUVの実験機で用いられているのは3枚または4枚構成のミラー系でNAが0.1前後のものであるが、将来的には6枚のミラー系構成でNA 0.25から0.30前後のシステムがターゲットとなっている。このような高性能の光学系を少ない枚数で実現する手段として、実際に高精度な非球面を加工し、計測し、所定の面形状の光学素子を得ることが従来技術の壁を打ち破るために必須の技術となってきている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、高性能が得られる設計値が得られても従来の非球面の加工では非球面の計測精度に限界があり、所定の値以上の非球面量を持った面は加工できないという問題点があった。該所定の値は所望の精度で計測できる範囲によって定められる。よく知られているように、計測と加工は一体のものであり、良い計測精度がなければ精密な加工を行うことは不可能である。

【0008】球面形状の計測の技術は光学素子の計測で最も通常に用いられる技術であるため汎用の装置も製品として存在しており、絶えざる精度向上の努力により精度も大幅に向かっている。しかしながら測定波長の10倍以上の大さな非球面量になると干渉縞の間隔が細かくなりすぎて球面計測と同じ計測精度を出すことが困難となる。通常、大きな非球面方法として機械的あるいは光学的なプローブを用いて非球面の表面を計測する方法も知られている。しかしながらプローブ法は種々の形状の

非球面に対応できるフレキシビリティは備えているものの、プローブ自体の計測限界や、プローブの位置計測の安定性などに問題があり、干渉計測法ほどの精度を出すことが困難である。

【0009】本発明は非球面の形状を球面と同じ精度で測定が可能で、かつ種々の面形状の測定に対応できる干渉計及びそれを用いた光学素子を用いた半導体露光装置の提供を目的とする。

【0010】

【課題を解決するための手段】請求項1の発明の干渉計は干渉を利用して光学素子の面形状を測定する干渉計において、参照光の波面を変形させる参照波面変形システムを有することを特徴としている。

【0011】請求項2の発明は請求項1の発明において前記参照波面変形システムは、光学素子の面形状を作成することが出来る面形状が可変の弾性変形ミラーを参照光側に有することを特徴としている。

【0012】請求項3の発明は請求項2の発明において前記参照波面変形システムは参照光側に、前記弾性変形ミラーとあらかじめ素性の分かった基準面を有し、弾性変形ミラーと基準面からの光束より形成される干渉情報を用いて、弾性変形ミラーの変形量をモニターする面変形量モニタ手段を有することを特徴としている。

【0013】請求項4の発明は請求項3の発明において参照光側に配置した基準面の形状は不变であることを特徴としている。

【0014】請求項5の発明は請求項3の発明において前記参照波面変形システムで用いる干渉用の光束の波長は光学素子の面形状の計測に用いる光束の波長と異なることを特徴としている。

【0015】請求項6の発明の干渉計は干渉を利用して光学素子の面形状を測定する干渉計において、参照光側には面形状を変化させることが出来る該弾性変形ミラー、物体光側では面形状の測定基準となる波面を作成することが出来る基準波面発生ユニットを具備することを特徴としている。

【0016】請求項7の発明は請求項6の発明において前記参照光側の弾性変形ミラーと、物体光側の基準波面発生ユニットを用い、両者の波面から所望の非球面波面を作成し、参照光の波面と物体光の波面を観察面において干渉させるよう、両者の調整を行うことを特徴としている。

【0017】請求項8の発明は請求項7の発明において物体光側の基準波面発生ユニットが波面の動径（R）の4次を中心とした低次成分を生成し、参照光側の弾性変形ミラーでは動径（R）の6次以上の高次成分を生成することを特徴としている。

【0018】請求項9の発明は請求項6, 7又は8の発明において前記基準波面生成ユニットは球面収差発生手段を有することを特徴としている。

【0019】請求項10の発明は請求項9の発明において前記球面収差発生ユニットは、複数のレンズを有し、このうち2つのレンズのレンズ間の距離を調整することによって球面収差を発生していることを特徴としている。

【0020】請求項11の発明は請求項2乃至10のいずれか1項の発明において前記基準波面生成ユニットはアルバレズレンズを有することを特徴としている。

【0021】請求項12の発明は請求項11の発明において前記アルバレズレンズは波面の動径の6次以上の波面成分が測定可能な範囲に調整することを特徴としている。

【0022】請求項13の発明は請求項12の発明において前記アルバレズレンズは、それが補正する波面の動径の次数に対応して複数個設けられていることを特徴としている。

【0023】請求項14の発明は請求項11の発明において前記アルバレズレンズは波面の動径の4次以上の波面成分が測定可能な範囲に調整することを特徴としている。

【0024】請求項15の発明は請求項6の発明において前記基準波面生成ユニットで可変的に波面を生成する際に、光軸上、移動する光学部材の位置情報をモニタする位置情報モニタ手段を有することを特徴としている。

【0025】請求項16の発明は請求項15の発明において前記光学部材の移動量に応じて、発生する波面を演算手段で計算し、基準波面として用いることを特徴としている。

【0026】請求項17の発明は請求項3の発明において前記面変形量モニタ手段で用いる干渉用の光束の波長は光学素子の面形状の計測に用いる光束の波長と同一であることを特徴としている。

【0027】請求項18の発明は請求項6の発明において物体光側の基準波面発生ユニットが生成する波面の動径の次数と参照光側の弾性変形ミラーが生成する波面の動径の次数とは互いに異なっていることを特徴としている。

【0028】請求項19の発明の半導体露光装置は請求項1乃至18のいずれか1項の干渉計を用いて作成された光学素子を用いることによって作成されたことを特徴としている。

【0029】請求項20の発明の面形状測定方法は、請求項1乃至18のいずれか1項の干渉計を用いて光学素子の表面形状を測定することを特徴としている。

【0030】請求項21の発明は、請求項2乃至8のいずれか1項の発明において参照光側にアルバレズレンズを有することを特徴としている。

【0031】

【発明の実施の形態】通常の球面を測定する干渉計は精度及び測定再現性などに長足の進歩を見せている。最近

では測定再現性で0.1nmに近づこうという精度を見せるまでになっており、EUV時代の計測装置としても使用出来る位のレベルに達している。

【0032】これに対し非球面の面形状の計測は非球面自体の要望があったにも拘らず、誤差要因が多いと言うことで、精度も要求を満たしていなかった。本発明の実施形態はこの球面と非球面との乖離をなくすことを特徴としている。このため、本発明の実施形態では精度上の達成値を球面波にすることを目標として、球面計測用の光学配置を基礎に非球面を計測する構成を用いている。

【0033】尚、本発明において非球面とは球面又は平面でないことを意味している。

【0034】本発明の実施形態では、非球面の波面を、参照光の波面と物体光の波面から、正確に合成して作っている。このとき参照光の波面は弾性変形ミラーで作成し、物体光の波面は光学系の収差をもとに発生させている。

【0035】参照光側は弾性変形ミラーを用いて自由に形状を作成できるため、所望の波面を作成することが容易である。

【0036】物体光側の基準波面の作成には様々な方法を用いることが出来るが、以下の考えをもとに光学系の収差を発生させることにより、汎用性の高いシステムを構築することが出来る。

【0037】最近の半導体製造装置における高精度な駆動の実現、及び計算機の発達は基準位置の収差さえはっきりしておれば、該基準位置からオープンループで各エレメントを駆動した後に発生する収差を正確に知ることを可能とする。本発明はこの点を考慮して非球面が球面からのずれと言う形で定義される以上、該非球面を収差とみなし、該収差量を収差発生光学系（基準波面発生ユニット）で発生させることによって、所望の非球面形状を持つ波面を発生させている。

【0038】本実施形態では任意の形状の非球面を、汎用で検出できることのできる干渉計を提供している。

【0039】本実施形態では、参照光側の波面を変形させるシステムを有し、この波面変形に弾性変形ミラーを用いることを特徴としている。

【0040】また参照光側の弾性変形ミラーの形状をモニターするための基準面を有し、弾性変形ミラーと基準面間で弾性変形量モニタ干渉計を構成することを特徴としている。

【0041】さらに、参照光側の弾性変形ミラーで作成した波面と、物体光側で発生させた基準波面によって、種々の非球面計測を行っている。

【0042】参照光側で用いる弾性変形ミラーは、例えば薄いガラス板をアクチュエーターやピエゾで制御することにより、自由にミラー形状（面形状）を変化させることが出来る構成となっている。この弾性変形ミラーを参照面として用いることにより、所望の参照波面を作成

している。また、この弾性変形ミラーの面形状をモニターするために、基準面(例えば平面ミラーや球面原器、非球面原器)を有し、この弾性変形ミラーと基準面とで干渉計を構成することによって、変形量を精度良くモニターしている。また、弾性変形ミラーの面形状のモニターには、計測波長と異なる波長を用いることで、変形量をモニターしながら、非球面形状の計測を行うことを可能としている。

【0043】尚、弾性変形ミラーの面形状のモニターで計測波長と同一の波長の光を用いても良い。

【0044】一方物体光側では、非球面形状の計測の基準となる波面を作成する。この基準波面は光学系の収差を基準波面作成ユニットによってコントロールして作成する。

【0045】次に物体光側で光学系の収差によって基準波面を作成する場合に関して、説明する。図1の基準波面作成ユニット3では、非球面を特徴づける非球面形状の各次数を、球面収差の発生やアルバレズレンズの組み合わせなどで独立に制御する。対象となる光学系は共軸であることが多いことから、光学素子は回転対称性を持っていることが多い。従って球面からのずれは光軸からの距離(動径)をRとした時、動径Rの4乗以上の偶数項で表わされる場合が通常である。特に重要なのは動径Rの4乗の項であるが、4乗の項は収差で言うと球面収差に相当する。そのため、基準波面作成ユニット3では、球面収差を故意に所望の値発生させて、非球面の形状が持っている成分に対応する波面を形成させる。但し、一般に非球面は動径Rの4乗だけでは表わすことができない場合が多いため、4乗以上の高次の項に関しては各次数ごとにアルバレズレンズを利用して制御できる収差を発生させることで、所望の非球面を構成する波面を合成することも可能である。また、アルバレズレンズで4次以上の総ての波面を発生させることも可能である。

【0046】本実施形態では、参照光側と物体光側でそれぞれ非球面波面を作成し、この波面をもとに観察面71で波面を干渉させることによって、任意の非球面形状の測定を可能としている。したがって、参照光の波面を弾性変形ミラーによって任意に変形させることが出来る。物体光側には、非球面形状測定の基準波面を作成する「基準波面発生ユニット」を具備することを特徴としている。

【0047】本実施形態では、参照光側で弾性変形ミラー、物体光側で基準波面発生ユニットを用いることによって、両者の波面を調整して合成するため、種々の非球面波面を容易に作成することが出来る。従って、装置自身を基準として様々な非球面を測定することができるため、極めて汎用性を持つ装置を構成している。また、汎用性があるにも拘らず干渉計測法であるために球面を測定するのと同じ精度が達成できるため、従来より高精度

で非球面の面形状を測定することが困難であった非球面の面形状を高精度に測定することができる。

【0048】次に本発明の実施形態を図を用いて説明する。

【0049】(実施形態1) 図1は本発明の実施形態1の要部概略図である。図1は被検面としての非球面の表面形状測定法を示している。本実施形態1は参照光側に弾性変形ミラー21を用い、物体光側に基準波面発生ユニット3を用い、両者の非球面波面を用いて、被検面5の非球面形状を測定するものである。そして、特に参照光側の弾性変形ミラー21では非球面の高次(波面の動径Rの6乗以上)の波面を作成し、物体光側の基準波面作成ユニット3では球面収差を発生させ、波面の動径Rの4乗以上の基準波面を作成する場合を示している。

【0050】尚、波面の動径Rの次数の発生は任意であっても良い。

【0051】図1に示す干渉計は通常トワイマン・グリーンの干渉計といわれる構成をとっている。レーザ光源1からコリメートされた光(平行光)が干渉計に入るところから図は始まっている。レーザ光源としてはHeNe、Ar、HeCd、YAGの高調波など公知のレーザを用いることができる。

【0052】コリメートされてきた光Laは先ずビームスプリッタ11で波面が分割され、参照光として参照面を形成する弾性変形ミラー21へ行く参照光路と、被検面5のある物体光路とに分割される。

【0053】その後参照光と物体光をビームスプリッタ11で合波し、レンズ61を介して、CCD等の撮像手段(観察面)71上に干渉情報を形成し、これより被検面5の面形状を測定している。

【0054】まず、参照光側の光路について説明する。

【0055】参照光路を行った光はビームスプリッタ12を通過し、弾性変形ミラー(参照ミラー)21で反射して、再びビームスプリッタ11に戻ってくる。高精度な計測精度を得るためにには位相計測をすることが必須となるのでPMI(Phase Measuring Interferometer)と言われる手法が適用される。例えば図1の構成では参照ミラー21が波長オーダで光軸方向に微小駆動されている。

【0056】この弾性変形ミラー21は、図2に示したように、例えば薄いガラス板21aをアクチュエーターやピエゾ等の駆動部材21bを駆動手段21cで制御することにより、自由にミラー形状(反射面形状)を変化させ、所望の非球面波面を作成している。

【0057】この弾性変形ミラー21を用いるためには、この変形量を精度良くモニターする必要がある。ピエゾやアクチュエーターの精度では計測精度が不十分のため、本システムは、図1に示すように、参照面の変形量をモニターするためのもう1つの干渉計(変形量モニター干渉計)101を参照面側に具備している。被検面

5の非球面形状を計測しながら、参照面の弾性変形ミラー21の変形量を随時モニターするためには、非球面の計測波長とは異なる波長を用いることが必要である。

【0058】非球面形状と弾性変形量の測定精度を比較すると、非球面形状の方がより高い精度が要求される。一般的に、波長の短い方が精度良く測定することが出来るため、光源1は変形量モニター干渉計101側の光源2より波長が短いレーザー光源を用いる場合を図1に示している。

【0059】また、非球面計測と変形量モニターに異なる波長を用いることで、リアルタイムに測定することができるため、ビエゾやアクチュエーターの不安定成分を常に検出し、フィードバックをかけることが出来るメリットもある。

【0060】尚、随時モニタする必要がないときは光源1と光源2からの光束の波長は同一であっても良い。

【0061】以下に、この変形量モニター干渉計101について、説明する。光源1より波長の長い光を放射する光源2からの光L_a2をコリメートし、ビームスプリッタ13で反射させたのち、もう1つのビームスプリッタ12で、波面を参照面である弾性変形ミラー21側と、基準面22である平面ミラー側に分割する。

【0062】弾性変形ミラー21からの光は再びビームスプリッタ12に戻って反射し、一方基準面22である平面ミラーから反射した光はビームスプリッタ12を透過する。この2つの波面を干渉させ、レンズ62、CCD72を通して参照面21の弾性変形量を面変形量モニタ手段103でモニターする。ここで用いたビームスプリッタ12は、参照面21の弾性変形量のモニターに用いる光源2からの光の波面を2つに分割し、非球面計測に用いる光源1からの光L_aの波長は透過するもの（ダイクロイックミラー）である。

【0063】さらに、基準面としてあらかじめ素性（面形状）の分かっている平面ミラー22を用い、上記に説明した参照光側の変形量モニター干渉計101によって変形量をモニターしながら、基準面（平面ミラー）22と弾性変形ミラー21を一致させることで、弾性変形ミラー21の平面キャリブレーションを行う。そして、キャリブレーション後、ビエゾやアクチュエーターによって、弾性変形ミラーの表面形状を変化させ、所望の非球面波面を形成している。

【0064】次に、図1の物体光側の光路について説明する。ビームスプリッタ11で波面が分割され、物体光路に分けられた光は基準波面発生ユニット3に入射する。基準波面発生ユニット3の構成は種々考えられるが、図1の構成では主として波面の動径Rの4乗に対応する波面を、基準波面発生ユニット3の中にある光学系の光軸方向の位置を調整し、球面収差を発生させていく。

【0065】ここではまず球面収差の発生法について説

明する。図1中32は第1のレンズ、33は第2のレンズである。レンズ32は図1の構成ではビームスプリッタ11から入射してくる平行光を点Aに結像する作用をする。レンズ32は軸上付近のごく小さい範囲だけ収差を補正しておけばよいので、収差量をきわめて小さく抑えることができる。またたとえレンズ32の収差が微小のこっていても、微小量であるためオフセット処理でキャンセルすることが可能である。以降の説明ではレンズ32の収差は無視することができるとして話を進める。

【0066】レンズ33は有限物点に対して収差の良く補正されたレンズである。例えば顕微鏡の対物レンズのようなもので、所定の物像位置関係で収差が良く補正されている。該レンズ33の結像は従って、所定の関係から外れた位置設定になっていると収差を多く発生する。干渉計の光学配置では軸上しか使用しないので、所定の関係からはずれて発生する収差は光軸に廻し回転対称な収差、即ち球面収差となる。

【0067】従ってレンズ32によって形成される結像点Aの位置がレンズ33の収差が補正されるべき物点の位置と一致しておれば、レンズ33を通過後に形成される結像位置における収差は極めてよく補正されている。図中Bで示されている点は後続のコリメータ4の収差が最もよく補正されている位置である。

【0068】点Bの位置が点Aのレンズ33による結像位置に合致すると、図1を構成する全ての光学要素が最も収差の小さくなる配置されたことになる。このようにレンズ32、33、コリメータ4が収差の最も良く補正される状態となった時、図1の干渉計は「基準状態」に配置されていると定義する。

【0069】基準状態についての記述を先に進めると、レンズ33によって点Bに結像した光は次いでコリメータ4に入射し、コリメータ4によって発散波を収束波に変換されて被検物体5に向かう。コリメータ4は結像点Bに対して収差補正されている光学系であるため、収束波は収差のない（収差の極めて少ない）波面となって被検物体5に向かう。即ち基準状態は球面の測定を行うのに適した配置となっている。基準状態で被検物体としてあらかじめ素性のわかっている基準球面を配置すればレンズ32からコリメータ4にいたる測定光学系の収差のオフセットを求めることができる。即ち、基準状態は被検面として球面の測定に適した状態であり、なおかつ測定系のオフセットをとる役割を果たす。なお、オフセットの取り方については”Optical Shop Testing”(Malacara編)等に詳しいので、ここでは詳述しない。

【0070】次いで非球面の測定について説明する。本発明者が測定対象となる非球面の形状を分析したところ、非球面の形状は回転対称型の光学系の場合、波面の動径Rの4乗、6乗、8乗、10乗、…の順番に低次から近似していくことが効率的なことが判明した。従って、物体光側の基準波面と参照光側の弾性ミラーによ

る波面を作成する際、測定できる範囲内に入るまで動径Rの4乗、6乗、8乗、10乗、…の順番に低次から波面を合成している。

【0071】図1に示した実施形態1では、物体光側において基準波面発生ユニット3で球面収差を故意に発生させ、非球面の主に動径Rの4乗の項を発生させ（正確には動径Rの4乗だけでなく動径Rの4乗以上の高次項も発生する）、参照光側において弾性変形ミラー21を用いて動径Rの6乗以上の高次を発生させ、両者の波面によって種々の非球面波面を作成できる構成となっている。

【0072】ここで物体光側の基準波面発生ユニット3による球面収差の発生は以下の手順で行われる。レンズ33は前に説明したように、レンズ32の結像点Aが所定の物点位置に来た時の点Bでの収差が補正される。従って、レンズ32を光軸方向に動かして点Aの位置をレンズ33の収差が取れる位置からずらすと、結像点の位置は点Bからずれて、しかも球面収差が発生したものとなる。

【0073】この間の様子を示したのが図3である。図3(a)はレンズ33の収差が良く補正されるレンズ配置で、レンズ32によって形成される結像位置点Aがレンズ33の収差の取れている点33pに結像し、点33qに結像している。基準状態では点33qがコリメータ4の収差の補正されている物点位置Bに一致している。次いで図3(b)に示すようにレンズ32を右に動かすことによって結像位置Aを点33p1の位置にずらす。ずらした結果、レンズ33による結像位置は点33q1に移動する。点33p1と点33q1は収差の取れた関係からずれているので球面収差が発生している。本実施形態ではこの球面収差を非球面の基準波面に利用している。コリメータ4との関係からレンズ32とレンズ33を一体として左側に移動すれば、レンズ33による結像位置を球面収差が発生した状態を保ったままで点Bに一致させることができる。一体として移動できるのはレンズ32に入射する光束が平行光束であることによる。

【0074】基準波面発生ユニット3による球面収差の発生量はレンズ32の結像点の移動量及び、移動方向で量及び符号の双方をコントロールすることができる。従って、動径Rの4乗の項は可変量として扱うことができる。本実施形態で目的の1つとするのはオングストロームオーダーまでの測定精度が可能な高精度な測定である。厳密にいとレンズ32、33の位置調整によって発生する収差は動径Rの4乗の項だけではないが、レンズ32、33の位置さえ精密にわかっているれば、その値をコンピュータで計算することにより、高次の項まで正確に発生する収差を計算することができる。計算された値は高次項も含め、基準波面の値として用いられる。

【0075】したがって、参照光側の弾性変形ミラー21による波面と物体光側の基準波面発生ユニット3によ

る基準波面とを作成する際、参照光側の弾性変形ミラー21の形状変化による非球面の波面作成、および物体光側ではレンズ32、33の位置調整による球面収差の発生を行い、これにより非球面形状が測定できる範囲内に入るまで動径Rの4乗、6乗、8乗、10乗、…の順番に低次から波面を合成していくことで、種々の非球面形状を測定している。

【0076】また、図1に示した本実施形態1では、レンズ32の位置検出を行うために、レンズ32の鏡筒の位置をモニタするレーザ干渉計（位置情報モニター手段）102を用いている。具体的にはレンズ32の鏡筒を移動させる機械部品32-1に位置をモニタするレーザ干渉計102からの光束32-2が入射している。レーザ干渉計の代わりにマグネスケールやエンコーダ等の位置検出素子を使うことも可能で、該モニタ機能を用いて演算手段104で計算を行うことにより発生する収差量を正確に知ることができる。

【0077】一方、レーザ干渉計102でモニタできるのはあくまで相対変位量なので、基準となる位置は別途決定する必要がある。基準となる位置を決定するためには前述の「基準状態」を利用する。光学系を基準状態におき、被検物体位置に素性のわかっている基準球面を置く、この状態で収差が予め分かっている基準球面のデータに最も近くなるようにレンズ32、33、コリメータ4、基準球面の位置を調整する。

【0078】調整した後にある許容値以内に入った状態で、レンズ32、33、コリメータ4の調整を終了する。この位置が位置検出素子（レーザ干渉計102）の基準位置となる。該基準位置からの駆動量が与える収差の発生量は、駆動量の測定精度から定まる精度で正確に計算することができる。レーザ干渉計102を用いれば駆動精度はナノメートルオーダまで可能であるため、発生する収差の値を知るには十分な精度である。

【0079】図1にはレンズ32にしか位置検出素子が示されていないが、その他の光学素子33、4、21などにも同様に位置検出素子が配置されている。

【0080】なお、ここでは、弾性変形ミラーのキャリブレーションおよび変形量モニター時の基準面として平面ミラーを用いたが、あらかじめ非球面量が測定されている複数の球面原器または非球面原器を用いても良い。

【0081】例えば図9に示すように球面量または非球面量が測定されている複数の原器A～Dを用い、その中から1つを選択して用いても良い。

【0082】さらに、本実施形態において、物体光側ではレンズ32、33の位置調整による球面収差の発生によって基準波面を作成する場合を説明した。球面収差の発生方法はこれに限ったものではなく、図4に例として示したような方法でも良い。本実施形態では基準波面発生ユニット3内のレンズ133が平行光入射に対して収差を発生させる機能を持っている。

【0083】図4 (A) はレンズ133を構成する2つのレンズ133a, 133bの間隔dを制御することによって球面収差の発生量を制御する方式である。間隔dの変化に伴う結像位置の変化はレンズ133全体を移動することによって調整する。また間隔dの基準位置は先の実施形態と同じくレンズ133とコリメーター4、基準球面を用いて、同じような基準状態を求めるこによって行う。

【0084】図4 (B) はレンズ133の後側の位置に厚さを連続的に変えることのできる全体として平行平板と成る楔形の2つのプリズム部材134, 135を挿入した例である。平行平板の厚さを可変にするには2枚の同じ角度を持つウェッジ134, 135を組み合わせ、光軸Oaと直交する方向に動かすことによって目的を達成することができる。この場合の基準位置の調整も先の実施形態と同じく基準状態をいったん達成することによって求めることができる。

【0085】図4 (C) は厚さの異なる複数の平行平板を離散的に変えて球面収差を制御する例である。この場合には該平行平板の厚さを正確に測定することを利用して、発生する球面収差を求めることができる。

【0086】本実施形態では以上の構成により弾性変形ミラー21を介した参照波面と、基準波面発生ユニット3、コリメーター4を通過し、被検面5で反射し、元の光路を戻った被検波面(信号波面)と、ビームスプリッター11で合成し、レンズ61によってCCD等の撮像手段71上に干渉波面を形成し、該撮像手段71からの信号(干渉信号)によって被検面5の面形状(面情報)を測定している。

【0087】(実施形態2) 図5は本発明の実施形態2の要部概略図である。本実施形態は、被検面として非球面の測定法を示している。本実施形態2は参照光側に弾性変形ミラー21を用い、物体光側に基準波面発生ユニット3を用い、両者の非球面波面を用いて、被検面5の非球面形状を測定するもので、基本的な構成は実施形態1と同じである。

【0088】本実施形態が実施形態1と異なるところは、物体光側の「基準波面作成ユニット」3で球面収差を発生させるとき動径Rの4乗以上、の他にさらにアルバルツレンズを用いて動径Rの6乗の波面を作成し、参照光側の弾性変形ミラー21では動径Rの8乗以上の高次の波面を作成することである。

【0089】実施形態1では、物体光側の基準波面作成ユニット3におけるレンズ32の位置調整によって主に動径Rの4乗の項の収差である球面収差を発生させる場合を説明した。しかし、実際の非球面は、このような動径Rの4乗の項のみで表わしきれるものではなく、より高次の項の導入も必要となる場合がある。レンズ32の位置調整だけで動径Rの6乗以上の高次の収差を自由に制御し、非球面の基準波面とすることが難しい場合があ

る。

【0090】そこで、本実施形態2では実際の非球面に存在する高次の形状を有する収差を発生させるため、アルバルツレンズ31を利用している。

【0091】以下にアルバルツレンズ31について説明する。

【0092】アルバルツレンズ31は図6に示すように同一形状の2枚組のレンズ31a1, 31a2で、 $f(x, y)$ で示される非球面形状をした面が対抗して近接して配置されたものである。2枚のレンズ31a1, 31a2の相対ずれがゼロである場合には、アルバルツレンズ31は平行平板と同じ働きをする。 $f(x, y)$ の形を適当に選択すれば2枚のレンズ31a1, 31a2の一方を光軸Oa方向と垂直のy方向に△、他方を一△駆動することにより高次の収差を自由に発生させることができる。例えばy方向にずらして6乗の特性を出すアルバルツレンズの形状 $f(x, y)$ は

$$f(x, y) = a(x^6 y + y^7 / 7)$$

とすると、互いに±△だけy方向にずれたアルバルツレンズの透過波面 $W(x, y)$ は、硝材の屈折率をnとすると

$$W(x, y) = 2a\Delta(n-1)(x^6 + y^6)$$

となり、ずらし量△に比例した波面を形成させることができる。ずらし量△を説明したようにプラスとマイナスに対称に構成すると、ずらし量△の偶数次の項が消えてずらし量△の非線形の効果を抑えることができる。発生する収差の量はずらし量△を制御することによって調整することができる。アルバルツレンズ31を特徴付ける非球面形状 $f(x, y)$ を理想的に作ることは困難であるため、製作誤差をキャリブレーションする必要がある。キャリブレーションの際には球面収差の場合と同じく基準状態と素性のわかっている基準面を用いて、測定を行いオフセット量を計算する。オフセット量は $f(x, y)$ の誤差、ずれ量△から発生する非線形効果等も含めて補正する。またアルバルツレンズの位置は位置検出素子を各アルバルツレンズに装着して検出を行う。

【0093】ここで説明したのは波面の動径Rの6乗の項の説明であったが、更に8乗の項、10乗の項も別のアルバルツレンズを挿入することによって制御することができる。挿入すべきアルバルツレンズの数は対象となる非球面の形状によって異なる。図5では31が動径Rの6乗の項を発生させるアルバルツレンズに対応している。

【0094】以上のように本実施形態2によって、参照光側に弾性変形ミラー21を用い、物体光側に基準波面発生ユニット3を用い、両者の非球面波面を用いて、被検面5の非球面形状を測定するものであって、特に物体光側の「基準波面作成ユニット3」では球面収差を発生することにより主に動径Rの4乗(正確には高次も発生する)、さらにアルバルツレンズ31を用いて動径Rの

6乗の波面を作成し、参照光側の弾性変形ミラー21では高次（動径Rの8乗以上）の波面を作成することによって、種々の非球面測定を可能にしている。

【0095】（実施形態3）図7は本発明の実施形態3の要部概略図である。

【0096】本実施形態の基本的な構成は実施形態1, 2と同じで、参照光側に弾性変形ミラー21を用い、物体光側に基準波面発生ユニット3を用い、両者で作成した非球面波面を用いて被検面5の非球面形状を測定するものである。特に本実施形態3は物体光側に2つのアルバレズレンズ31a, 31bを用いたことを特徴としている。

【0097】本実施形態では「基準波面作成ユニット3」で球面収差を発生することにより主に動径Rの4乗以上に比例する球面収差の発生量を制御し、さらにアルバレズレンズ31aが動径Rの6乗に比例する波面、もう1つのアルバレズレンズ31bが動径Rの8乗に比例する波面を作成し、参照光側の弾性変形ミラー21では動径Rの10乗以上の高次の波面を作成することによって、種々の非球面測定を可能にしている。アルバレズレンズ31a, 31bの基準位置は実施形態1と同じくレンズ32, 33とコリメータ4、基準球面を用いて、同じような基準状態を実現した上でアルバレズレンズを挿入していくオフセットを求めることができる。

【0098】尚、実施例2と同様に、挿入するアルバレズレンズの数は、対象となる非球面形状によって異なる。

【0099】（実施形態4）図8は本発明の実施形態4の要部概略図である。

【0100】本実施形態の基本的な構成は実施形態1, 2と同じで、参照光側に弾性変形ミラー21を用い、物体光側に基準波面発生ユニット3を用い、両者の非球面波面を用いて、被検面5の非球面形状を測定するものである。本実施形態は物体光側のアルバレズレンズ31aに動径Rの4乗の収差発生を負担させている。

【0101】本実施形態ではレンズ33が平行光を収差なく結像させる機能を持っている。図中、アルバレズレンズ31aが動径Rの4乗に比例する球面収差の発生量を制御する。アルバレズレンズの基準位置は実施形態1と同じくレンズ32, 33とコリメータ4、基準球面を用いて、同じような基準状態を実現した上でアルバレズレンズ31aを挿入していくオフセットを求めることができる。そして、参照光側に配置した弾性変形ミラー21を用いることによって、物体光側のアルバレズレンズ31aで発生しない動径Rの6乗以上の高次項に比例する収差の発生を行う。

【0102】尚、実施例2、実施例3と同様に、挿入するアルバレズレンズの数は、対象となる非球面形状によつて異なる。

【0103】（実施形態5）図10は本発明の実施形態5

の要部概略図である。

【0104】本実施形態は実施形態1に比べて参照光の波面を変形させる参照波面変形システムとして弾性変形ミラーの代わりにアルバレズレンズ31と平面ミラー21aを用いている点が異なっているだけであり、その他の構成は同じである。

【0105】本実施形態において、アルバレズレンズ31を波面の動径の次数に合わせて複数用いても良い。

【0106】尚、本実施形態においてアルバレズレンズ31の代わりに波面の動径の所定の次数を発生させることができるCGH (Computer Generated Hologram) を用いても良い。この場合複数のCGHを所望の波面に応じて取替え、あるいは切換える可能な構成にしてもよい。

【0107】以上述べたように本実施形態によれば、参照光側に波面を変形させることができるシステムを用い物体光側に基準波面発生ユニットを用い、波面を調整して合成するため、種々の基準波面を非球面の形状ごとに作成することができる。

【0108】また、装置自体が基準となるため、原器として装置を使うことができる。更に本実施形態は基準として発生させる波面を高精度に可変制御できるため、種々な非球面を測定に対応することができ、極めて汎用性が高い。又、汎用性があるにも拘らず干渉計測法であるために球面を測定するのと同じ精度で非球面を測定することができる。

【0109】本実施形態によれば、従来より設計値としては存在したが実際には加工が困難であった非球面光学素子を容易に製作することができる。又、EUVのように精度が厳しい上に、使うことのできる枚数が限られている光学系で、従来、実際には加工計測上の観点から適用することのできなかった範囲にある非球面を持つ光学素子を利用できる。この他、本実施形態によればEUVだけでなく従来のUV、DUV、VUV領域の露光装置における非球面にも適用することができる。又、非球面を用いることにより光学系のフレキシビリティが増したこと、高精度の半導体露光装置を達成することができる。

【0110】また、本実施形態によれば半導体露光装置だけでなく、他の光学装置にも同様に適用することができる。以上の各実施形態の干渉計のうちの1つを用いて作成された光学素子を第1の物体（レチクル）上に形成されたパターンを第2の物体（ウエハ）上に結像させて露光する投影露光装置における投影光学系に用いている。

【0111】これによって高い光学性能の投影光学系の製造を容易にしている。

【0112】

【発明の効果】本発明によれば非球面の形状を球面と同じ精度で測定が可能で、かつ種々の面形状の測定に対応できる干渉計及びそれを用いた光学素子を用いた半

導体露光装置を達成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の非球面測定の干渉計の実施形態1の要部概略図

【図2】 図1の変形ミラーの概要図

【図3】 図1の一部分の球面収差の発生を示す説明図

【図4】 本発明に係る種々の球面収差を発生する為の説明図

【図5】 本発明の非球面測定の干渉計の実施形態2の要部概略図

【図6】 図5のアルバレズレンズの原理説明図

【図7】 本発明の非球面測定の干渉計の実施形態3の要部概略図

【図8】 本発明の非球面測定の干渉計の実施形態4の要部概略図

【図9】 図1の一部分の変形例

【図10】 本発明の非球面測定の干渉計の実施形態5の要部概略図

【符号の説明】

11, 12, 13 ビームスプリッタ

21 参照面の弾性変形ミラー

22 基準面

3 基準波面発生ユニット

32, 33 レンズ

4 コリメータ

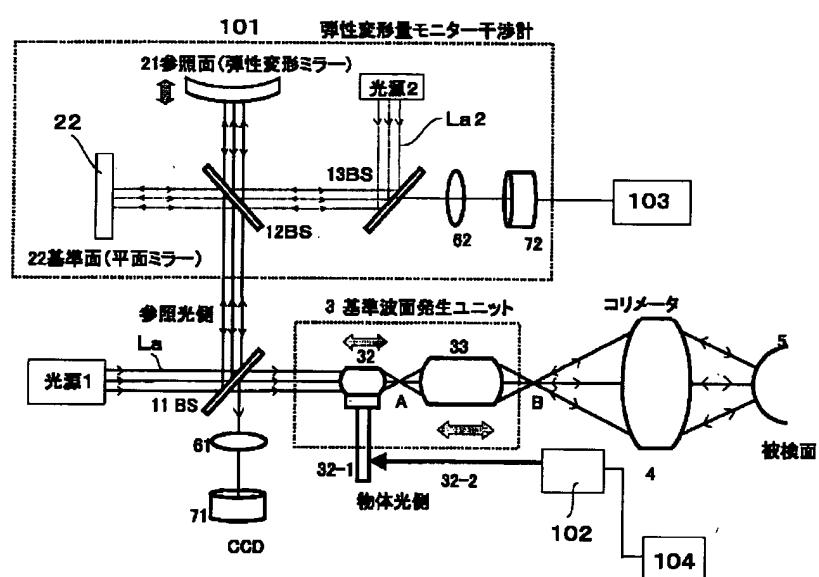
5 被検物体

61, 62 結像レンズ

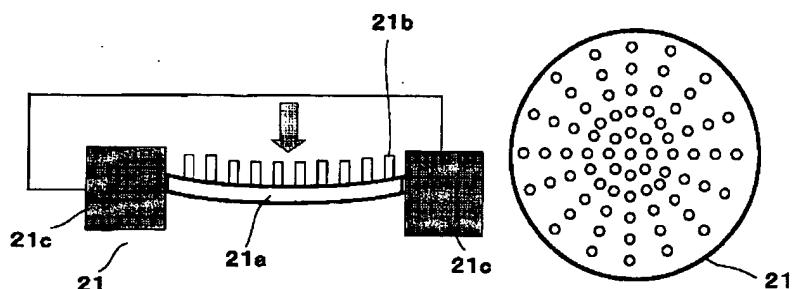
71, 72 CCD

31a, 31b アルバレズレンズ

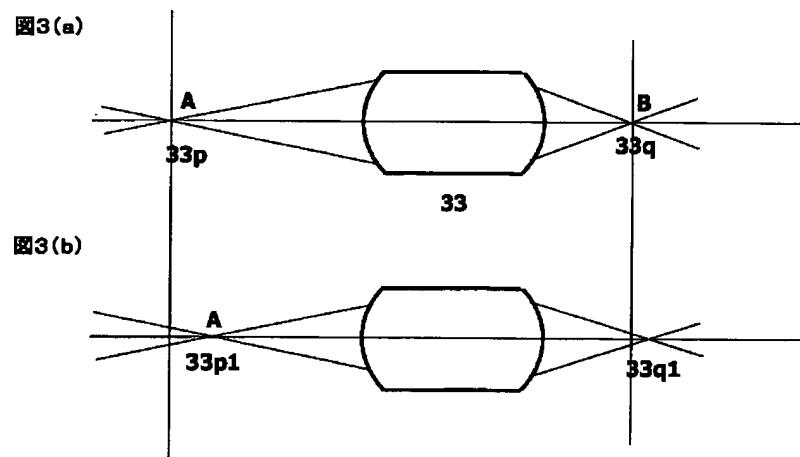
【図1】



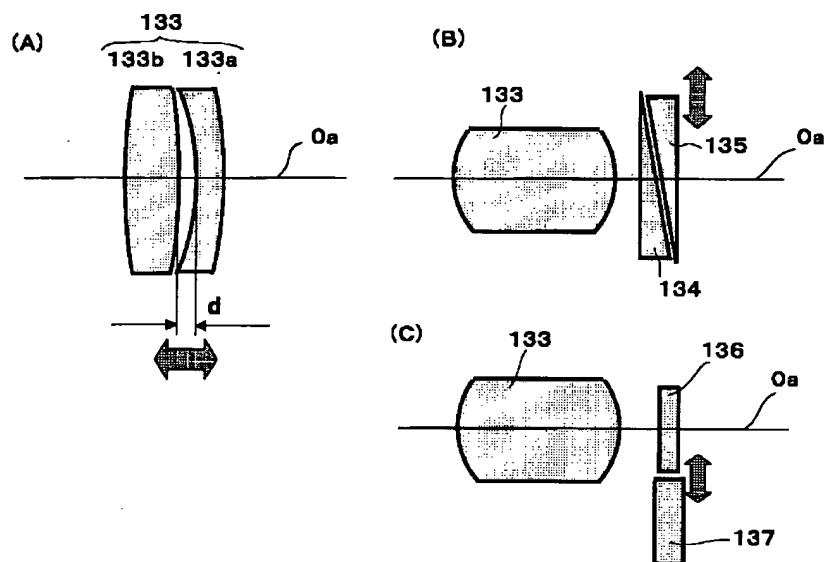
【図2】



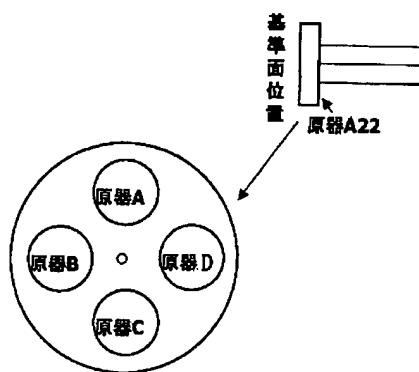
【図3】



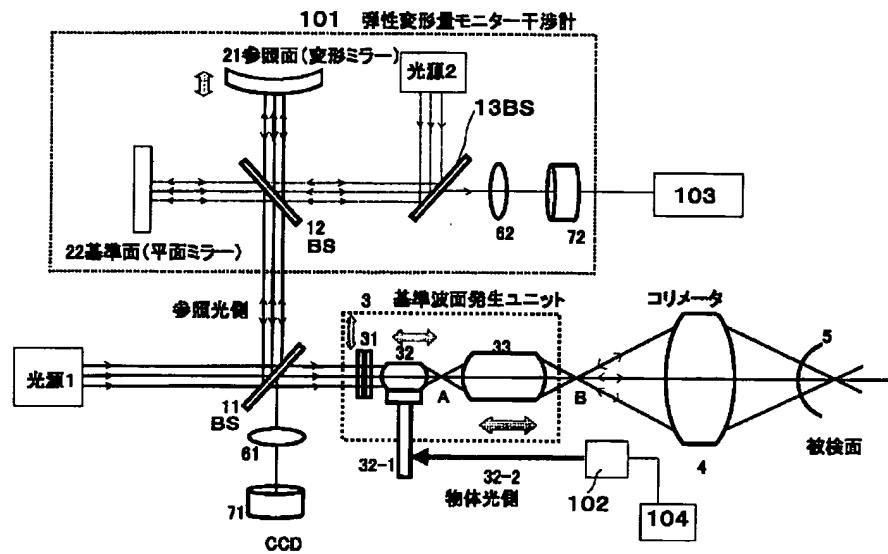
【図4】



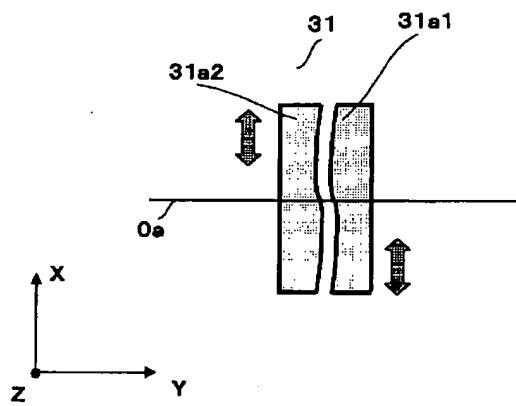
【図9】



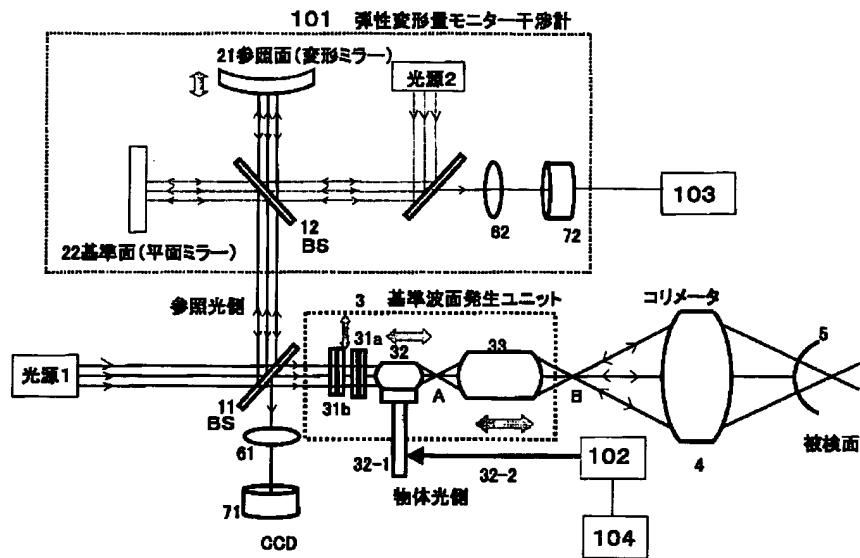
【図5】



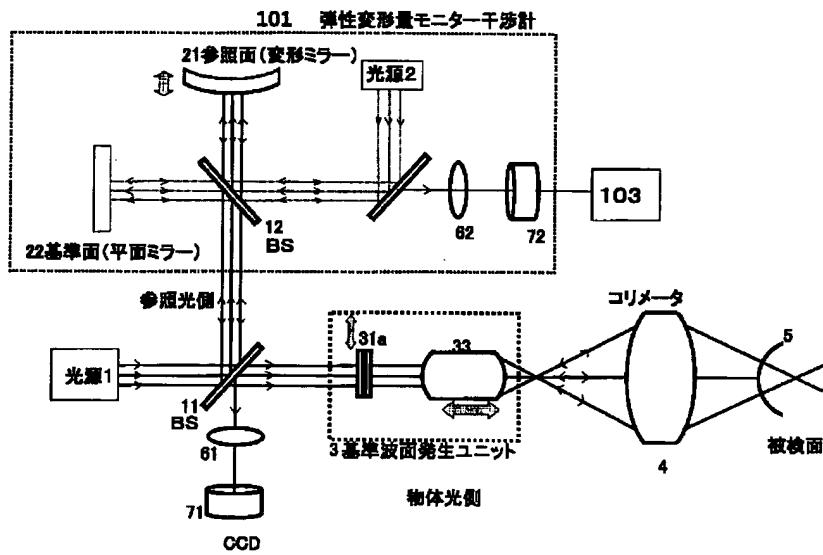
【図6】



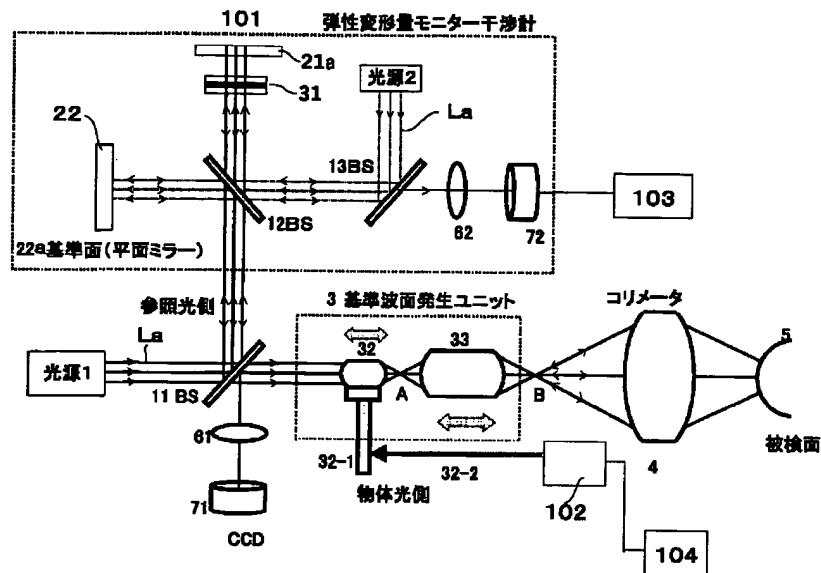
【図7】



【図8】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者 斎藤 謙治
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤ
ノン株式会社内

F ターム(参考) 2F064 AA09 AA11 BB05 CC04 EE02
FF02 GG11 GG13 GG22 GG70
HH03 HH08 JJ01